

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.02.XX

帕克太阳探针七年探测的主要科学发现

罗佩欣^{1,2}, 谭宝林^{1, 2}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 中国科学院国家天文台, 北京, 100101, 中国)

摘要: 帕克太阳探针 ([Parker Solar Probe, PSP](#)) 是迄今实际抵日距离最近的空间探测器, 自发射以来已经稳定运行了 7 年, 相关载荷及其协同观测为太阳物理和空间物理领域的重大问题的研究提供了前所未有的契机。本文对这 7 年里的观测历程所取得的重要科学发现进行梳理, 包括慢速太阳风的起源和演化、大尺度磁场反转 [Switchbacks](#) 的结构证认、湍流的演化与能量耗散对太阳风加热的贡献、近日空间尘埃环境及高能粒子的加速、暗光子暗物质探测等。上述结果对未来新一代太阳空间探测计划提供了 [重要的](#) 借鉴和参考。

关键词: 太阳探测; 太阳风; 空间天气

中图分类号: P182 **文献标识码:** A

1 引言

帕克太阳探针 (Parker Solar Probe, PSP) 于 2018 年 8 月发射升空。这是美国宇航局 (NASA) 继“太阳神” (Helios) 系列探测器 (1974—1976 年) 和其他太阳探测卫星 (如 SOHO、ACE、SDO 等) 之后, 又一个新的太阳探测器, 多次通过金星的引力辅助逐步降低轨道, 最终进入离太阳表面只有约 610 万公里 (约 8.5 个太阳半径) 的内日冕进行直接探测。2024 年 12 月 24 日第 22 次近日点已达到上述距离目标。

PSP 主要聚焦如下 3 个核心科学 [目标](#)^[2]:

- 1) 追踪日冕加热和太阳风加速的能量流;
- 2) 确定太阳风源头的等离子体和磁场结构及其动力学;
- 3) 探索 (日球层) 高能粒子传输和加热机制。

收稿日期: YYYY-MM-DD; 修回日期: YYYY-MM-DD

资助项目: 中国科学院先导 B 项目 (XDB0560302); 科技部国家重点研发项目 (2021YFA1600503, 2022YFF0503001 and 2022YFF0503800); 国家自然科学基金 (NSFC No. 12173050); 中国子午圈计划和国际子午圈计划 (183311KYSB20200003)

通讯作者: 谭宝林, bltan@bao.ac.cn

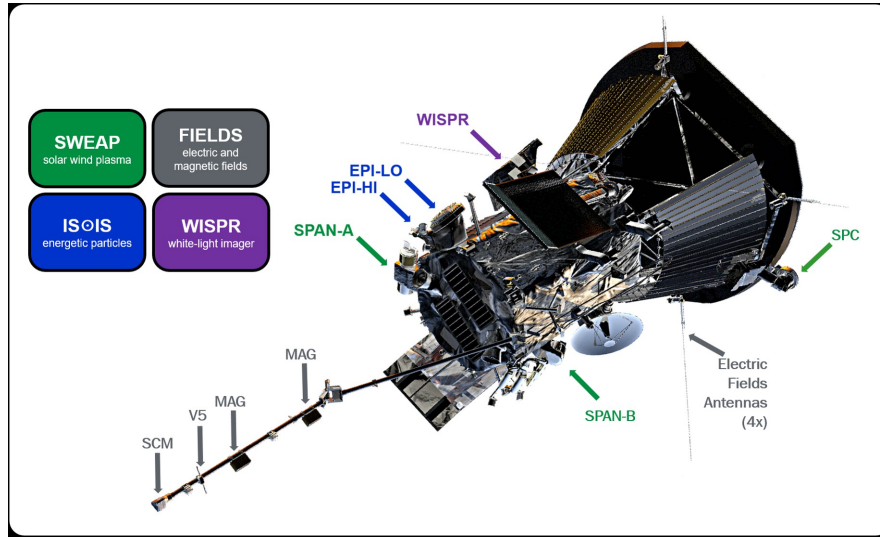


图 1 PSP 载荷整体构型示意图^[1]

为了达成上述科学目标，PSP 设计了 4 个科学载荷（图 1），分别是 Fields Experiment (FIELDS)、Integrated Science Investigation of the Sun (IS⊙IS)、Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) Investigation 和 Wide-field Imager for Solar Probe (WISPR)。其中，FIELDS、IS⊙IS 和 SWEAP 均为原位测量载荷：

1) FIELDS，由五个电压探针（V1——V5）、三个磁强计（MAGi、MAGo 以及 SCM），以及相关电子系统（DFB、TDS、RFS 和 DCB）组成。原位测量电场、磁场、等离子体波、电子密度、温度，以及行星际射电辐射。揭示日冕加热和太阳风加速机制，研究内日球层物理、验证现有日冕 - 太阳风理论模型并探索内日球层星际尘埃环境^[3]。

2) IS⊙IS，由两台独立的仪器（EPI-HI 和 EPI-LO），其中 EPI-HI 测量相对较高能量的高能粒子，EPI-LO 测量相对较低能量的高能粒子。IS⊙IS 专注于内日球层高能粒子（1 keV 至数 MeV）的探测。其核心科学目标是揭示太阳高能粒子事件（Solar Energetic Particle events, SEPs）的起源、加速与传输机制，并与 FIELDS 和 SWEAP 的数据结合给出完整解释，这也是 PSP 多载荷协同的特色所在^[4]。

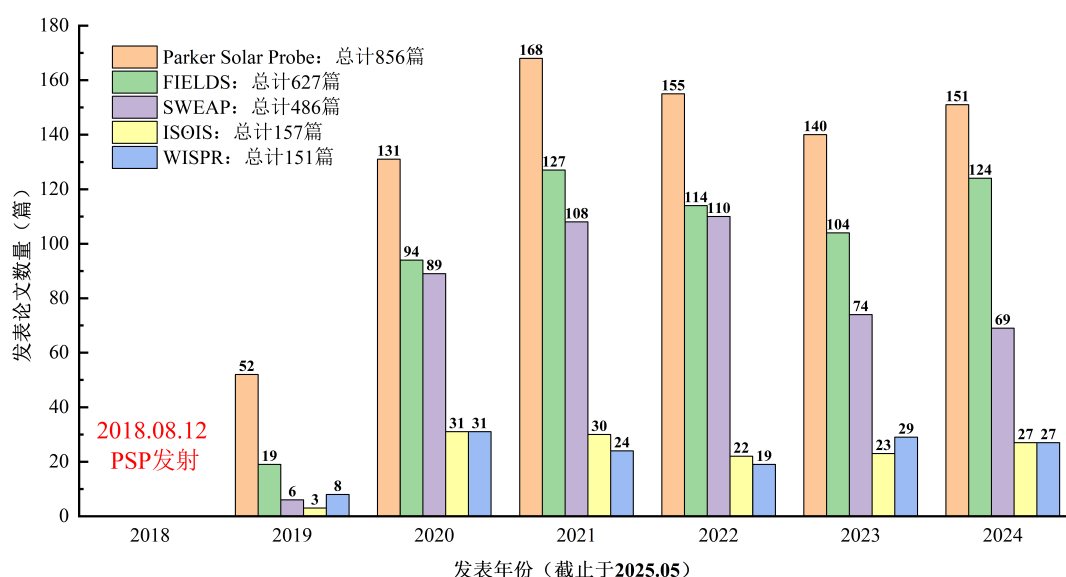
3) SWEAP，由 4 个独立的太阳探测分析器（Solar Probe Analyzer, SPAN）组成，分别为 SPAN-Ai、SPAN-Ae、SPAN-B 以及 Solar Probe Cup (SPC)，其目的是探测太阳风的主要粒子（电子、质子和氦离子）及其基本特性。科学目标聚焦于热等离子体粒子特性的直接测量。与 FIELDS 的准热噪声（QTN）方法间接测量电子密度不同，SWEAP 通过直接测量不同粒子及其不同组分电子的三维速度分布函数（VDF），以高时间分辨率（16Hz）获取密度、速度、温度等多项参数。将对太阳风起源的微观机制、日冕加热与粒子加速的微观过程、日冕小尺度结构的粒子特性以及多组分等离子体的动态行为开展深入研究^[5]。

4) PSP 唯一不是原位测量的载荷是宽视场成像仪（WISPR），用于拍摄日冕和日球层内

部的三维图像, 以及所经路径上太阳风、激波等结构图像。WISPR 主要通过高分辨率成像提供日冕和日球的大尺度背景信息, 辅助 FIELDS、SWEAP 和 ISOIS-EPI 等原位测量载荷, 连接局部测量与日冕的全局结构^[6]。

本文将尝试对 PSP 在过去 7 年里的观测成果及其重要科学发现进行梳理, 旨在为我国下一步太阳空间探测计划提供重要借鉴和参考。

2 PSP 的重要科学发现



注: 载荷对应论文数量是指使用了相关载荷数据的论文数量, 一篇论文根据数据使用在不同载荷统计时会重复计数。

图2 PSP 及其各载荷的科学论文每年发表数统计

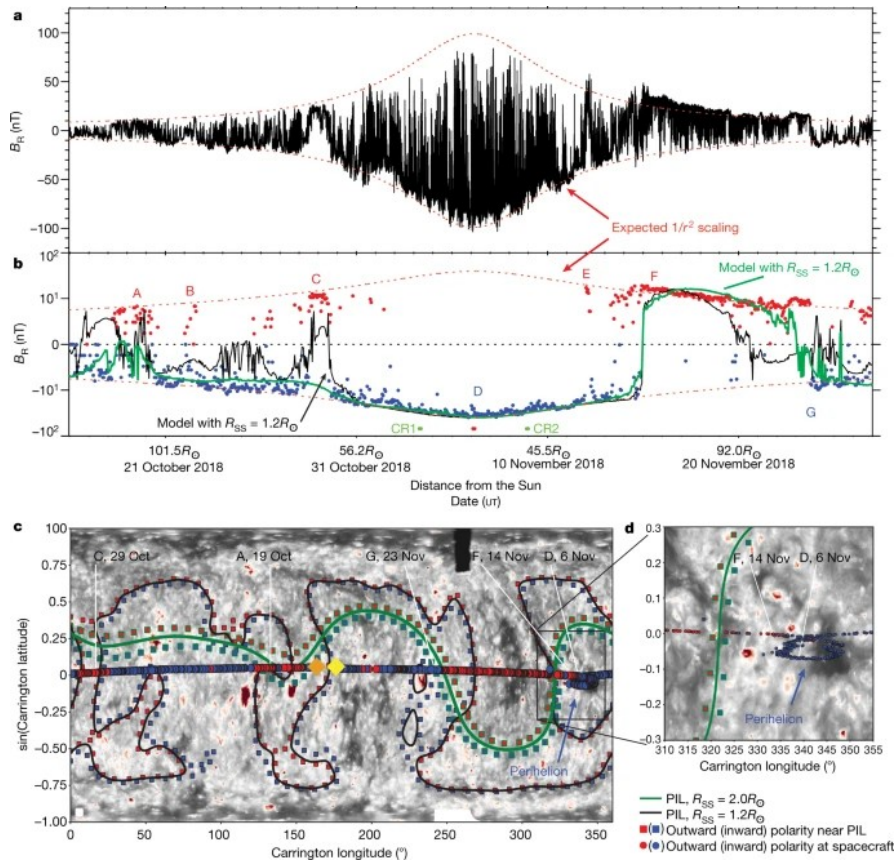
PSP 于 2018 年 11 月首次飞掠近日点 (Encounter 1, E1)。2019 年开始有基于 PSP 观测数据公开发表的科学论文, 截止到 2025 年 5 月, PSP 共完成 25 轨飞掠, 先后发表 856 篇研究论文, 统计结果见图 2。[这里对其重要科学发现进行梳理。](#)

2.1 关于太阳风的起源、结构与演化的新发现

太阳风是太阳释放的高速带电粒子流, 可分为快速太阳风和慢速太阳风。通常认为快速太阳风起源于高纬度冕洞, 慢速太阳风的起源和形成机制却复杂而存争议, 存在多种假说: 盔状冕流的顶端磁重联、冕洞边缘开放场与闭合场的交换磁重联或来自具有高度开放场的冕洞内部。以往受观测所限, 无法给出慢速太阳风起源的实证。

Bale 等^[7]利用 FIELDS 在 E1 期间的观测和势场源表面模型 (Potential field source surface model, 即 PFSS 模型) 及弹道回溯法 (Ballistic mapping) 将 PSP 处的太阳风磁力线溯源至

对应的日冕源区，并利用 SDO 的极紫外成像进行源区比对，首次发现慢速太阳风源于赤道小型冕洞（如图 3），并具有高结构化特征：在总体呈 $1/r^2$ 衰减的背景径向场中，镶嵌着间歇性的大振幅磁场极性反转及伴随等离子体喷流。该喷流内的相对背景太阳风更高的磁压缩性及以阿尔芬波为主的波动特征则表明，冕洞内某种脉冲式能量注入机制（如纳耀斑或边界处的交换磁重联）可能驱动了慢速太阳风的能量补给及其精细结构的形成。FIELDS 的等离子体波数据还进一步揭示出电子与离子速度空间中的微观不稳定性，暗示波-粒相互作用可能在太阳风加热中发挥作用。



注：图 d 显示 PSP 观测到的一处小型赤道冕洞，表明慢速太阳风源自该冕洞

图 3 E1 期间径向磁场极性序列随时间和日距的变化与 PFSS 回溯结果图^[7]

PFSS 模型的一个关键参数，源表面高度 R_{ss} ，是假设磁场完全径向化后对应的球形表面半径，被认为是日冕与日球层的分界面，通常设定 $R_{ss} = 2.5 R_{\odot}$ 。Badman 等^[8]对 Bale 等的研究进行了扩展。他们发现，若降低 R_{ss} ($1.3-2.0 R_{\odot}$) 和拼接 3 天间隔的动态磁图，会显著提高对小尺度结构的预测能力，但会影响对大尺度结构的预测，不存在一个全局最优的 R_{ss} 值。研究尺度上，对慢速太阳风的溯源，他们将研究时段扩大，发现磁力线是从多种不同的源区

出发的,除了上述赤道冕洞,还有中纬度冕洞,甚至可能是活动区。为后续研究提供了更精确、更全面的内日球层(0.5 AU 内)的磁场连接性框架。Panasenco 等^[9]基于 PSP 磁场数据对 PFSS 模型进一步研究指出,传统球形 PFSS 假设在模拟太阳风源区连接及磁场极性分布,尤其是极性反转区域时,存在明显局限。他们提出源表面高度应随磁场拓扑或活动周期动态调整,未来需发展具有空间变化的非球形 PFSS 模型,以更准确地刻画太阳风源区结构。

PSP 的近日观测与 1 AU 处其他探测器的结合,得到了一个更完整的太阳风演化图景。Panasenco 等^[9]结合 WIND 航天器在 1 AU 的观测,发现快速和慢速太阳风都存在显著的阿尔芬性,但慢速太阳风的阿尔芬性在 1 AU 处部分退化,快速太阳风则保持了较强的阿尔芬性,这一发现挑战了慢速太阳风缺乏阿尔芬性的传统观点。

FIELDS 的子系统 RFS (Radio Frequency Spectrometer) 还提供了日冕和内日球层的射电辐射和 QTN 频谱数据。Moncuquet 等^[10]利用 QTN 频谱分析了 E1 和 E2 期间原位电子密度和温度,揭示了内日球层(约 0.17–0.46 AU)电子温度径向分布随日心距离呈 $R^{-0.74}$ 幂律下降,显著偏离绝热冷却,表明存在非经典加热过程。超热电子温度 (T_h) 基本保持恒定,不随径向距离变化,是无碰撞特征的有力证据。

对 E1 期间 FIELDS 的电磁数据的小波变换,并与 SWEAP 等离子体数据计算得到的质子回旋频率 (f_{ci})、多普勒位移的质子共振频率 (f_Ω)、质子回旋半径对应频率 (f_ρ) 等离子尺度参数进行比对,Bowen 等^[11]研究了内日球层太阳风中离子尺度电磁波的统计特性,发现 1) 这些波在 30–50% 的径向磁场区间中出现,且在该区间对总磁涨落能量的贡献超过 70%。2) 波的平均振幅约 4 nT,平均持续时间约 21 秒(最长可持续近 50 分钟)。3) 波的频率峰值位于多普勒位移的质子回旋共振尺度 (f_Ω),并在质子回旋半径对应尺度 (f_ρ) 以上被截止,表明其与离子回旋共振及耗散过程相关。4) 波的振幅和持续时间缺乏显著的径向依赖,支持波通过原位等离子体不稳定性驱动,而非源自日冕的传播过程。通过对电磁波的研究,Bowen 等的工作为理解太阳风加热机制提供了关键观测约束。

关于慢速太阳风的起源问题,Bale 等人提出了低纬冕洞可能是慢速太阳风重要来源的新证据,同时,冕流作为起源的研究也取得了重要进展。Rouillard 等人^[12]在 E2 期间,利用 SWEAP 等离子体原位测量数据、FIELDS 磁场数据,以及 SOHO、STEREO 和 PSP/WISPR 白光成像,进行联合分析,发现当 PSP 磁力线连接至冕流结构时,SWEAP 测量到了高密度、剧烈波动的等离子体,且 FIELDS 在此区域探测到大量 Switchbacks 结构;反之,当 PSP 暂时脱离冕流区时,则测量到稀薄、稳定的太阳风,这说明,慢速太阳风中观测到的密度不均匀性和 Switchbacks 可能由冕流边缘开放-闭合场的磁重联驱动。这一发现为慢速太阳风至少部分起源于冕流及其边界区域的观点提供了新的、有力的观测依据。

SWEAP 的等离子体数据在太阳风加热和加速机制研究中至关重要。Halekas 等^[13]利用 PSP 在 E1 和 E2 的数据首次详细报道了近至 0.17 AU 处的太阳风的电子特性。发现近太阳处电子速度分布函数(VDF)同样由核(Core)、晕(Halo)和束(Strahl)三个成分构成。电子密度和温度随日心距减小而增加的径向变化规律与更远距离的观测一致,但 Halo 电子密度在近日点附近不增反降,导致在近日点超热电子中 strahl 电子占主导,与 1 AU 处的状况相反。Core 电子的向阳飘逸(sunward drift)则有效地平衡了 strahl 电流,满足了电中和

条件。在 0.25 AU 以内发现了电子温度、热通量与太阳风流速呈显著反相关，表明了近日电子仍保留着日冕源区特征。Verniero 等^[14]基于 SWEAP 的 SPAN-I 探测器对等离子体的质子进行研究，首次在 36–45 $R_{\odot}$ 区域获得下传分辨率为 7 s 的三维质子速度分布函数 (VDF) 数据，并结合 FIELDS 磁场数据，发现质子束与离子尺度波同时出现，非热力学平衡的质子束具有较高的密度比（如 $(n_b/n_c)^* \approx 3.3$ ）和超阿尔芬漂移速度（ $v_D \approx 1.5\text{--}1.7v_A$ ），足以驱动离子回旋不稳定性 (IC) 或磁声不稳定性 (FM)，最大线性增长率可达 $\frac{\gamma}{\Omega_p} \approx 10^{-2}$ ，并可能通过波粒相互作用促进太阳风的加热与热化。

2.2 有关太阳风湍流的新发现

在当前主流理论框架中，湍流被认为是驱动日冕加热、太阳风加速过程的核心物理载体。湍流作为自然界普遍存在的非线性多尺度耗散过程，核心特征是能量从大尺度（驱动尺度）注入后，通过跨尺度级联向小尺度（耗散尺度）传递，最终在微观尺度通过粘性、碰撞或磁化等离子体特有的耗散机制（如阿尔文波破碎、磁重联）转化为热能或粒子动能。而日冕与太阳风均属于典型的磁化等离子体环境，其能量需求（从大尺度磁结构到微观粒子的能量传递）与湍流的多尺度能量级联-耗散特性高度契合，因此，湍流耗散机制被广泛用于解释日冕加热及太阳风加速的能量传递与粒子加热过程。

1941 年，Kolmogorov 提出了著名的 K41 理论，预测不可压缩、各向同性流体湍流的惯性区能谱满足 $E(k) \propto k^{-\frac{5}{3}}$ 的标度律。然而，在日冕及太阳风这类磁化等离子体环境中，磁场扮演着关键角色，所以必须采用磁流体力学 (MHD) 框架来描述湍流。上世纪六十年代，Iroshnikov^[15]与 Kraichnan^[16]分别独立地将磁场引入湍流理论，提出了首套完整的 MHD 湍流模型，即 Iroshnikov - Kraichnan (IK) 理论。该理论假设在强背景磁场下，各向同性的湍流由反向传播的 Alfvén 波包通过弱非线性相互作用实现能量串级，由于串级过程受 Alfvén 传播时标限制，级联效率降低，从而得到一维能谱指数 $-\frac{3}{2}$ 。进入 1980 年代，Shebalin、Matthaeus 与 Montgomery^[17]基于数值研究指出，在存在背景磁场时，MHD 湍流具有显著各向异性，且主要的非线性相互作用发生在垂直于背景磁场的方向。这一关键发现后来被卫星观测广泛证实。基于各向异性湍流的物理图像，Goldreich 与 Sridhar^[18]提出了著名的临界平衡理论 (GS95 理论)。该理论认为，在强背景磁场下的稳态湍流中，非线性串级时标 τ_{nl} 与 Alfvén 波传播时标 τ_A 在各尺度上趋于平衡 ($\tau_{nl} \sim \tau_A$)。临界平衡条件直接导致了尺度依赖的各向异性：特征尺度满足 $\ell_{\parallel} \propto \ell_{\perp}^{\frac{2}{3}}$ ，并给出垂直方向的能谱 $E(k_{\perp}) \propto k_{\perp}^{-\frac{5}{3}}$ ，而平行方向能谱会更陡，是 $E(k_{\parallel}) \propto k_{\parallel}^{-2}$ 。随后，Lithwick、Goldreich & Sridhar^[19]将 GS95 扩展至不平衡（单向波主导）的情形，给出在强不对称 Alfvén 湍流中依然维持 $-\frac{5}{3}$ 标度的理论预言。另一条重要扩展由 Boldyrev^[20]提出，他引入动态对齐 (dynamic alignment) 概念，指出随着尺度减小，对应的速度与磁场扰动趋于排列，从而削弱非线性相互作用，导致垂直方向湍流能谱指数可由 $-\frac{5}{3}$ 变为更平缓的 $-\frac{3}{2}$ 。

在上述主流湍流级联理论之外，Zank 与 Matthaeus^[21,22]从湍流的弱可压缩性出发提出了近不可压缩磁流体 (Nearly Incompressible MHD, NI MHD) 理论，该理论指出，在太阳风典型的低马赫数 $M \ll 1$ 的条件下，密度和压力扰动仅为高阶小量，因此湍流主要表现为不可压缩的 Alfvénic 与准二维结构，同时伴随弱可压缩的慢模、密度涨落和熵模等扰动。基于

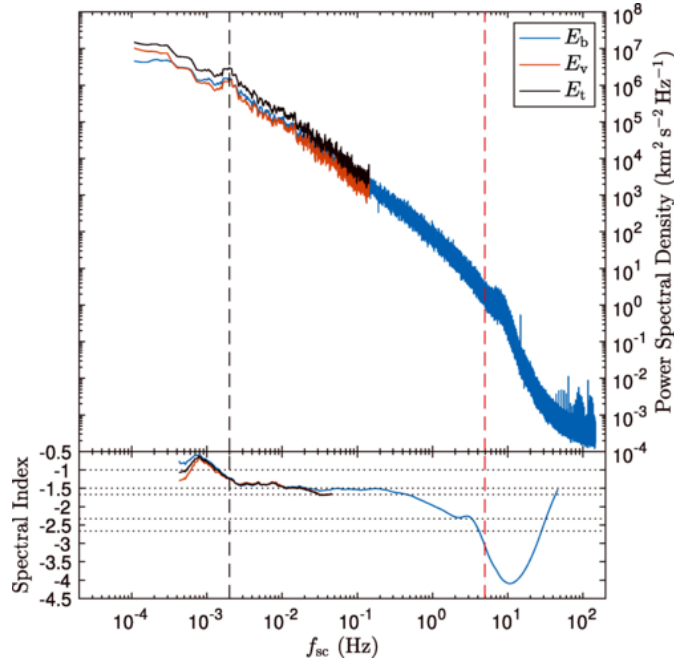
卫星观测的湍流结构特征, Zank 与 Matthaeus 进一步提出了著名的 2D - slab 分解模型, 其中 2D 成分对应波数满足 $k \perp B_0$ 的准二维涡旋 / 磁场结构, 而 slab 成分则由沿背景磁场传播的 $k \parallel B_0$ 的 Alfvén 波组成。后续研究表明, 这两类结构可以分别与 NI MHD 的不同阶方程相对应, 因此被视为近不可压缩太阳风湍流的两个主要物理子成分。另一方面, 自 IK 理论提出以来, 各湍流模型普遍假设能量级联依赖反向传播的 Alfvén 波相互作用。因此, 为解释太阳风中向内传播的反向阿尔芬波的来源, 自上世纪七十至九十年代逐渐形成了一类基于 Alfvén 波反射机制的湍流模型, 如 Heinemann 与 Olbert^[23]、Velli^[24]、Verdini 与 Velli^[25]等工作, 它们从背景速度剪切、密度梯度或磁场膨胀等效应出发, 解释反向波的产生并刻画其在湍流级联中的作用。

总体而言, 由于太阳风自身的复杂性, 其湍流理论形成了多条彼此关联或相互竞争的分支。PSP 在近日的观测为区分不同湍流模型、验证理论假设以及发展新的湍流物理框架提供了前所未有的实验基础, 从而推动了太阳风湍流研究的持续深入发展。

Chen 等^[26]发现, 从 0.17 AU 到 1 AU, 湍流总能量下降约一个数量级, 磁场能量下降约两个数量级。在 0.17 AU 处, 速度、磁场和 Elsässer 场谱指数约 $-\frac{3}{2}$, 数值上与 IK 理论一致, 但考虑太阳风的强 Alfvén 性, 文章认为存在多种可能性, 更倾向于 Boldyrev 提出的动态对齐模型。磁场谱指数在 0.6 AU 过渡到 $-\frac{5}{3}$, 磁压缩率 ($C_B = \left(\frac{\delta|B|}{|B|}\right)^2$) 随径向增加显著升高, 部分由等离子体 β 和慢模增强引起。外向阿尔芬波能流在 0.17 AU 占总能流约 10%, 在阿尔芬点 (0.1 AU) 达 40%, 支持湍流驱动太阳风模型。内向 Elsässer 场能量随距离平缓变化, 符合反射驱动级联。湍流外尺度随距离增大, 非线性时间远小于传播时间, 表明 0.17 AU 处湍流已接近准稳态, 为小尺度耗散加热太阳风提供理论依据。

尽管目前理论认为太阳风湍流中横向磁场扰动占主导, 其谱指数常被认为符合临界平衡理论, 但对沿磁场方向分离出的平行谱, 其指数预测仍存在争议。Zhao 等^[27]对 E1 和 E2 数据进行严格场向低磁压缩率的区间筛选, 分离出两个慢速太阳风场向湍流事件, 发现其平行谱为 $E_{k_{\parallel}} \propto k_{\parallel}^{-\frac{3}{2}}$, 且间歇性较弱, 表明谱型未受间歇结构显著影响。这一结果与临界平衡理论预测的 $E_{k_{\parallel}} \propto k_{\parallel}^{-2}$ 不符, 但支持另一太阳风湍流模型 NI MHD 理论在以单向阿尔芬波为主导的观测数据下给出的平行谱指数推论 ($-\frac{5}{3}$)。

Chen 等统计揭示了太阳风湍流从 0.17 到 1 AU 的径向演化特性, Telsoni 等^[29]首次利用 PSP 和 Solar Orbiter 的径向对齐, 通过弹道传播模型 (Ballistic Propagation Model) 和磁场互相关精确识别了同一太阳风等离子体团, 在 E6 期间将湍流径向变化的分析在空间距离上扩展到了 0.1 AU, 发现在近太阳处 (0.1 AU) 太阳风呈现高度阿尔芬性、湍流状态尚未充分发展 (谱指数约 $-\frac{3}{2}$, 磁压缩率低 0.1, 弱间歇性); 至 1 AU 处湍流演化较为完全 (谱指数为 $-\frac{5}{3}$, 磁压缩率增强, 呈强间歇性)。在 E8 期间 PSP 首次穿越阿尔芬临界面, 进入了磁主导的亚阿尔芬太阳风区域 ($M_A < 1$), Kasper 等^[28]首次给出了该区域内磁场与速度涨落的湍流功率谱 (图 4), 揭示其谱指数从低频的 -1 向惯性区 $-\frac{3}{2}$ 的转变。在此基础上, Zank 等人^[30]对亚阿尔芬太阳风区域的湍流进行了更深入分析, 发现外向传播的阿尔芬波强度远超内向传播一个量级以上。针对单向阿尔芬波为主的观测结果, Zank 等人判断这并非太阳风湍流的实际情况, 应该是受了探测器观测角度的限制。推断 NI MHD 理论设想的准二维湍流占



注：上图是功率谱，下图是谱指数。其中蓝线是磁场，红线是等离子体速度，黑线是总能量。

图 4 亚阿尔芬太阳风区域内磁场、等离子体速度以及总能量湍流功率谱的观测结果^[28]

能量主导更符合太阳风的观测特征。Zank 等扩展了 NI MHD 理论，明确了该理论中 2D 分量与 slab 分量的贡献占比，其理论模型与观测的高度吻合为上述论断提供了关键证据。

湍流在惯性区具体如何耗散？Bowen 等^[31]通过功率谱分析、小波偏振识别等方法首次证实离子回旋共振对无碰撞磁化湍流耗散的介导作用：左旋偏振离子回旋波与湍流在离子动力学尺度强耦合，是大尺度电磁涨落耗散的主要路径。

FIELDS 的磁场观测在太阳风湍流研究中起着决定性的作用。Adhikari 等人^[32]采用“先等离子体、后磁场”的两步验证：先用 SWEAP 的等离子体数据计算湍流参数（包括湍流动能 $\langle \mu^2 \rangle$ 、速度涨落的相关长度 l_μ 、密度涨落方差 $\langle \rho^2 \rangle$ 和质子温度 T ）与 NI MHD 模型预测进行比较，研究了慢太阳风中完全发展的湍流在 35–130 $R_\odot$ 的演化，发现模型与观测吻合良好，为 Adhikari 等人在冕洞快太阳风中引入磁场量改进模型奠定了基础。然后，Adhikari 等人^[33]进一步构建了一个全新自洽的湍流驱动太阳风模型，用于描述源自冕洞、且磁场与速度场高度对齐的快速太阳风。该模型耦合了背景太阳风流体方程和 NI MHD 理论的传输方程，并假设 slab 成分具有高度阿尔芬性。利用 FIELDS 和 SWEAP 的各项数据，将模型预测与观测对比，发现在湍流能量、密度涨落方差等关键统计量上，理论值与观测值高度一致。Ruffolo 等人^[34]也利用 PSP 的数据提出了关于初生太阳风（Nascent Solar Wind）在阿尔芬临界区附近观测特征演化的一个重要假说并进行了验证。该假说认为，日冕的条纹状结构向外演化为各向同性的絮状湍流结构，这一转变是由速度剪切所驱动的。具体而言，在阿尔

芬临界区内, 相邻磁流管之间的速度差异受到强磁场的约束, 一旦到阿尔芬临界区外, 磁场约束力减弱, 储存于速度剪切中的能量便通过非线性磁化开尔文 - 亥姆霍兹不稳定性释放出来, 从而驱动湍流, 促使涨落趋于各向同性, 并产生 Switchbacks 等现象。SWEAP 提供了等离子体速度来证明确实存在足够大的速度剪切, FIELDS 提供了磁场数据来证明速度剪切的驱动产生了预期的效应, 是 PSP 多载荷协同观测优势的一大体现。

湍流能量级联率 (ϵ) 的测量, 即能量从大尺度向小尺度传递的速率是验证湍流耗散支撑太阳风的加热加速这一理论机制的核心。1 AU 处的观测已证明 ϵ 能解释太阳风偏离绝热膨胀所需的加热。理论上越靠近太阳, ϵ 应越高, Bandyopadhyay 等^[35]基于 FIELDS 与 SWEAP 的联合数据, 首次在 0.17–0.25 AU 之内定量给出了 $\epsilon \approx 2 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 比 1 AU 处高两个量级, 并与全球模拟一致, 直接支持了湍流加热太阳风的机制。

等离子体湍流的基本观测量包括速度、磁场和密度。尽管惯性区的密度涨落通常较弱 (约 10%), 却是揭示湍流压缩性与能量串级路径的关键。Krupar 等^[36]基于 PSP 的首次近日观测, 系统分析了 0.5–10 MHz 频段 III 型射电暴的衰减时间剖面。他们发现衰减时间谱在约 1 MHz 处存在显著拐点, 并首次反演出在 2.5–14 $R_\odot$ 范围内, 相对密度涨落 ϵ 从 0.22 下降至 0.09, 且在 35.7 $R_\odot$ 处与先前远程观测推断的 $\epsilon \approx 0.06$ –0.07 一致。这一发现不仅提供了内日球层密度涨落强度的首次原位约束, 也暗示了阿尔芬点附近太阳风性质转变可能影响湍流特性或辐射机制。在此基础上, Kontar 等人^[37]构建了一个统一各向异性密度湍流模型, 其核心目标正是定量描述从太阳至 1 AU 的密度涨落功率谱及其散射效应。该模型通过一个关键参数, 密度涨落的谱加权平均波数 $\overline{q\epsilon^2}$ (直接正比于散射率, 并主要由内尺度附近的密度涨落幅度 $\langle \delta n_i^2 \rangle$ 所决定), 将其径向剖面表述为:

$$\overline{q\epsilon^2} R_\odot = 2 \times 10^3 \alpha \left(1 - \frac{R_\odot}{r}\right)^{2.7} \left(\frac{R_\odot}{r}\right)^{0.7}, \quad (1)$$

其中各向异性参数 $\alpha \approx 0.25$ –0.4。该剖面在 4–7 $R_\odot$ 处的峰值, 直接对应了密度涨落散射强度的最大值。

除了对密度涨落的数值进行研究, 我们要系统理解它的起源与表现, 一个核心切入点便是研究其相对涨落幅度 $\delta\rho/\rho_0$ 与湍流马赫数 (Turbulent Mach Number, 记作 M_t) 之间的定量关系。 M_t , 定义为湍流速度脉动的均方根与声速的比值 ($M_t = \frac{u'_{rms}}{c_s}$), 它直观衡量了湍流脉动激发压缩效应的潜力: 当 $M_t \ll 1$ 时, 流动近似不可压; 当 $M_t \sim 1$ 时, 进入跨声速状态, 可压缩效应显著; 当 $M_t > 1$ 时, 则可能形成超声速激波状结构。早期基于 NI MHD 理论 (适用于均匀背景场) 的预测认为, 相对密度涨落应与 M_t 呈平方关系 ($\delta\rho/\rho_0 \propto M_t^2$), 但以往在 1 AU 附近的观测证据却存在争议, 未能给出确定性结论。Fu 等^[38]进行了一系列的三维可压缩 MHD 模拟, 其参数设置参照了 PSP 观测到的近太阳区域特性 (低 β 、高 M_t), 率先提出, 在惯性区间内相对密度涨落实际与 M_t 呈线性关系, 且其主要源于低频非线性结构而非 MHD 波, 这一发现暗示, 在模拟参数所代表的近日条件下, 湍流的可压缩串级可能由非线性结构主导, 其串级路径与不可压缩阿尔芬湍流有本质区别。Cuesta 等^[39]利用 PSP 前八个近日点的观测数据, 首次在近太阳区域 (~ 0.07 –0.23 AU) 系统检验了这一关系, 发现

$\delta n_p / \langle n_p \rangle \propto M_t^{1.18 \pm 0.04}$, 明确偏离经典平方标度, 与 Fu 等人的模拟结果定性一致, 从而在观测上否定了经典均匀场 NI MHD 理论的普适性, 支持了非均匀背景或非线性结构主导的图像。进一步地, Zhao 等^[40]通过整合 PSP 更多近日点及 Solar Orbiter 数据, 并采用分距离段精细拟合, 揭示标度关系并非恒定。在极近日区域 ($\sim 10\text{--}20 R_\odot$) 呈现接近平方的标度, 随着距离增加, 标度指数连续下降, 至远日区域 ($> 40 R_\odot$) 渐趋线性。从理论模拟到整体观测验证, 再到空间演化规律的揭示, 反映了湍流可压缩性随等离子体条件及背景场不均匀性的系统性变化。

在能量串级方面, Brodiano 等人^[41]利用 PSP 前六次近日点穿越的数据, 基于可压缩磁流体力学的精确关系 (exact law), 对太阳风湍流的不可压缩与可压缩能量串级率进行了系统性统计研究。他们发现: 越靠近太阳, 无论是可压缩还是不可压缩能量串级率的绝对值均急剧增大。另外, 当局地的等离子体可压缩性增强时, 此处的可压缩串级率的增长会更为显著。该研究首次明确量化了密度涨落对能量传输的直接贡献, 修正了传统不可压缩模型可能低估的近太阳湍流加热率。Zhao 等^[40]于上文提及的研究也发现, 越靠近太阳, M_t 也随之增大至跨声速, 密度能谱会显著变平 (谱指数从约 -1.87 变至约 -1.4), 这再次印证了可压缩性会直接改变惯性区串级过程的观点。

同样是对密度涨落的来源进行研究, Zank 等^[42]的研究则采用了一种创新的模态分解方法。他们在线性理论框架内, 成功地将 PSP 在亚阿尔芬太阳风中观测到的湍流涨落, 分解为八种基本的 MHD 模。这一方法的关键突破在于, 它不仅包含了符合色散关系的传统波模, 还首次明确分离出了非传播的静态结构, 即熵模和磁岛模。应用这一方法, 他们获得了关于密度涨落来源的清晰诊断: 熵模 (非传播的密度结构) 和后向传播的慢磁声波是其主要且贡献近乎相等的两个来源, 而快磁声波在低 β 等离子体下本质是磁涨落, 因此对密度涨落的贡献可以忽略。这与 Fu 等早前的结论看似矛盾实则不然。关键区别在于对“慢磁声波”的界定, Fu 等基于严格的时空色散关系, 认为其贡献甚微, 而 Zank 等的线性分解则将具有慢模空间特征但非传播的结构同样归为此类。因此, Zank 等观测识别的“慢磁声波”主要成分, 很可能正是 Fu 等所指的“类慢模非线性结构”。两项研究共同否定了经典 MHD 波的主导角色, 确认了非传播结构的核心地位。

有关日冕中湍流传输的各种理论和建模, 以及 PSP 的数据在验证上述模型中所起的作用, 可参考综述^[43]。

2.3 有关 Switchbacks 的新发现

Switchbacks, 指太阳风中的径向磁场 (B_R) 的大尺度、间歇性、快速反转现象, 通常伴随速度尖峰。这一现象在早期太阳风探测中已有报道, 但都局限于快速太阳风。例如, Behannon 和 Burlaga^[44]在 Helios 观测中发现 0.3 AU 处的太阳风存在磁场突然反转现象, 称为“field reversals”或“deflections”。Borovsky^[45]指出, 这些结构通常伴随速度尖峰且在传播中保持稳定。Horbury 等^[46]对 Helios 数据的重新处理发现, 在 0.3 AU 的高速太阳风中, 大振幅速度增强 (Velocity Spikes) 及与之关联的大磁场偏转普遍存在。Balogh 等^[47]报道了 Ulysses 在太阳极区穿越高速太阳风时观测到的“磁场方向频繁反转”现象, 特别是在慢-快太阳风交界处。此外, 在各种太阳距离上科学家们都有磁反转现象的发现^[48–53]。

在理论层面, 人们提出了多种可能机制, 例如 Matteini 等^[54, 55]认为非线性的大振幅阿尔芬波可形成类似锯齿状的结构; Borovsky^[56]则归因于光球层磁拱足点的运动导致磁场弯曲; 此外, 交换重联机制也被认为可能在冕洞边界产生扭曲的开放场结构^[57, 58]。模拟研究(如 Velli 等在 2011 年的研究^[59])也探讨了磁场扭结的形成。

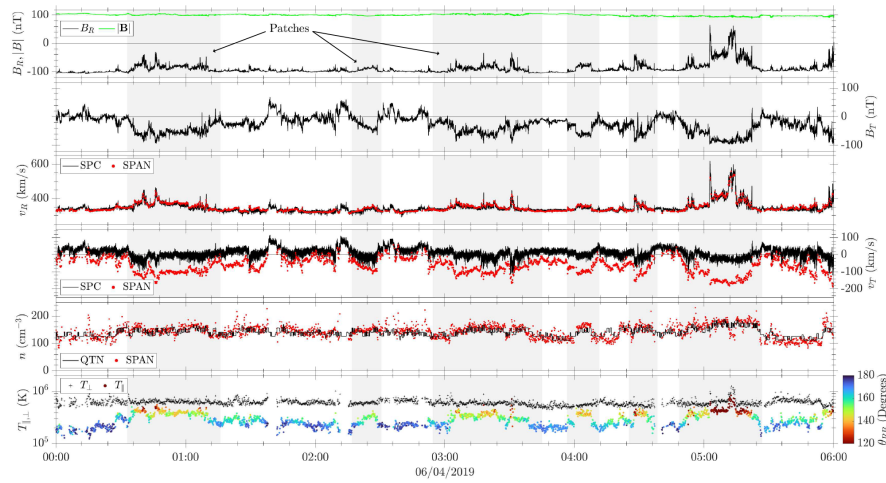
总之, 在 PSP 之前, 磁场反转的现象已被多次捕捉到, 但受限于观测距离、分辨率以及其在慢速风中未被系统证实, 对其起源、演化和普遍性的认识非常有限。PSP 在 36–54 $R_{\odot}$ 距离上的测量(E1)首次揭示了这些结构在慢速太阳风中的普遍性, 并使 Switchbacks 成为相关现象的标准描述, 成为一个独立的研究方向。这一革命性发现由同期《Nature》上发表的两篇“数据互补”文章首次详细报道。Bale 等^[7]首次利用 FIELDs 数据发现背景磁场(主要为径向)的快速、大角度偏转甚至反转(图 3), 而总磁场强度几乎保持不变。与此同时, Kasper 等^[60]利用 SWEAP 的数据揭示了与这些磁场偏转相伴的等离子体动力学特征: Switchbacks 内部的太阳风流速显著增加(约 20%)和质子径向温度升高。这两项开创性工作共同构成了后续研究的基石, 确立了 FIELDs 和 SWEAP 载荷在近太阳研究中的核心地位。

McManus 等^[61]利用 FIELDs 磁场与 SWEAP 等离子体数据研究了 Switchbacks 的拓扑结构, 计算了 Switchbacks 的交叉螺度, 发现 Switchbacks 内部阿尔芬波的传播方向会随局部磁场方向发生反转, 证明了 Switchbacks 是磁场自身的局部弯曲或折叠, 而非连接至太阳表面相反极性区的结构。Mozer 等^[62]进一步量化了 Switchbacks 的能量特性, 发现其内部存在显著的径向 Poynting 通量, 幅值遵循 $S \propto B^2 \sin^2 \theta$ 的关系, 证明了电磁能从外部向 Switchbacks 内注入, 为解释其内部太阳风流速增加的能量来源提供了关键机制。

根据磁场和等离子体扰动特性, Krasnoselskikh 等^[63]将 Switchbacks 分成三类: 阿尔芬类、压缩类、完全反向类。这揭示了 Switchbacks 本质上是内部等离子体参数(流速、温度、 β 值)异常的动态局域化磁通量管。为了在统计上验证这些特性, Larosa 等^[64]基于 FIELDs 的 MAG 和 SCM 数据, 对 70 个 Switchbacks 事件进行分析, 证实约 73% 的 Switchbacks 属于阿尔芬性类($|\mathbf{B}|$ 恒定), 27% 属于压缩类($|\mathbf{B}|$ 变化), 且密度与磁场波动存在不同的相关性, 暗示多种波模的存在。边界分析显示其多为旋转间断(Rotational Discontinuity), 并伴有强电流和强波动, 支持 Switchbacks 是电流片包裹的局域化磁结构图像。

Dudok 等^[65]发现 Switchbacks 在幅度和持续时间上呈连续、无特征尺度的分布, 具有显著的“长记忆性”, 即倾向于聚集出现。谱分析还发现 Switchbacks 之外的太阳风区域, 其湍流能谱的注入区范围更宽, 惯性范围更短, 暗示了其演化程度更低, 更接近原始的太阳风状态, 突显了 Switchbacks 对湍流级联的影响。Fargette 等^[66]通过对 FIELDs 磁场数据进行小波分析, 研究了 Switchbacks 的宏观分布, 发现 Switchbacks 存在两个特征空间调制尺度, 分别与太阳表面的超米粒组织和米粒组织尺度吻合。这表明 Switchbacks 的形成很可能与低日冕物理过程相关, 并受到太阳表面对流活动的调制。

Switchbacks 并非孤立存在, 往往成群出现, 形成持续数小时甚至数天的 patches^[69]。Woodham 等^[67]利用 SPAN-Ai 的 3D 速度分布函数和 SPC 数据, 揭示了这些 patches 的一个关键等离子体特征: 质子平行温度显著增强, 而垂直温度保持相对恒定(图 5)。通过对



注: (a) 径向磁场分量 (B_R) 和磁场总强度 ($|B|$); (b) 横向磁场分量 (B_T); (c) 质子核心径向速度 (v_R) 和横向速度 (v_T)。黑色实线为 SPC 测量值, 红色圆点为 SPAN-Ai 拟合值; (d) 质子核心数密度 (n_p) 和电子数密度 (n_e); (e) 质子平行温度 ($T_{p,||}$) 和垂直温度 ($T_{p,\perp}$)。 $T_{p,||}$ 的颜色标尺表示磁场与径向的夹角 (θ_{RB})。

图 5 PSP 在 E2 期间观测到的多个 patches 的等离子体与磁场特征^[67]

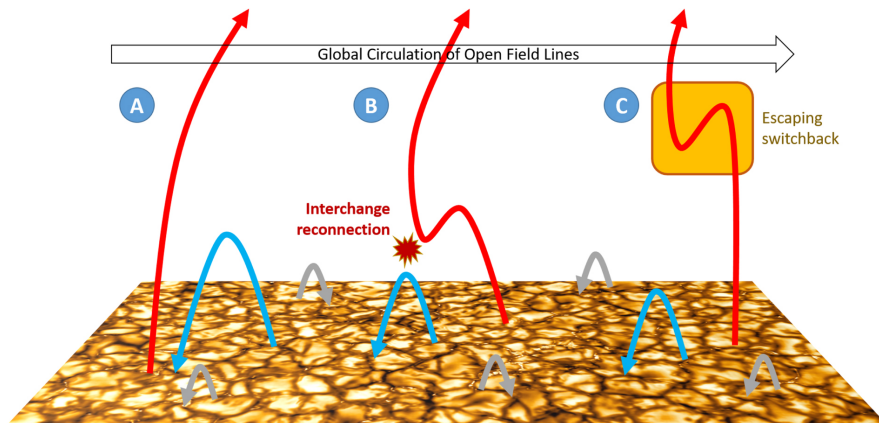


图 6 交换重联驱动的太阳开放磁通量全球循环模型^[68]

3D 速度分布函数的精细拟合与多仪器交叉验证, 排除了仪器视场效应的可能, 确认了平行温度增强是真实的物理加热过程。平行温度的增强与磁场偏离径向的角度密切相关, 表明 Switchbacks 是嵌入在具有独特加热或能化过程的大尺度结构中的。这一发现为 Switchbacks 起源于日冕中的磁重联等过程提供了有力支持。

这里讨论一下多载荷和多视角协同分析构建 Switchbacks 的起源与演化的完整物理图景。Horbury 等^[69]为强调 Switchbacks 的阿尔芬波扰动特性, 在研究中采用“spikes”一词来描述 E1 期间观测到的 switchbacks。他们发现这些结构在磁场和速度分量上表现出高度相关的阿尔芬特性, 是叠加在背景太阳风上的向外传播的阿尔芬扰动。Switchbacks 起源的主流

假说之一是发生于低日冕中的交换磁重联。对于交换磁重联, Fisk & Kasper^[68] 利用 FIELDs 磁场方向与 SWEAP 流速数据, 证实了开放磁通量通过交换重联实现全球循环的模型。该模型表明 PSP 观测到的 Switchbacks 是开放磁力线被拖拽穿过低纬度的大型日冕环发生重联后形成的 (图 6)。

Zank 等^[70] 的线性 MHD 理论模型表明, 日冕中闭合磁环与开放场之间的交换重联可激发以快磁声波速 ($\approx v_A$) 传播的磁场大角度偏转扰动。其径向演化特征与 FIELDs - SWEAP 联合观测的 Switchbacks 及等离子体参数变化高度一致, 并预言探测器依穿越位置不同可记录到单峰或双峰型的 Switchbacks 结构, 从而为观测事件的几何判别提供依据。与 Zank 等人的模型不同, Drake 等^[71] 的二维粒子模拟 (PIC) 则认为, 日冕中的交换重联可生成以强轴向磁场为特征的磁通量绳, Switchbacks 实际是磁通量绳在太阳风中的表现。这一结构与 FIELDs 在 Switchbacks 中观测到的切向磁场主导现象 (即 $B_T \gg B_R, B_N$) 高度一致。此外, 模拟还显示多个磁通量绳可沿磁力线排列, 表明单个宏观 Switchback 或其复杂变体可能由多个相邻通量绳串联构成, 为观测中常见的多层磁场偏转提供了微观物理解释。

Bale 等^[72] 首次建立了 Switchbacks 与光球层超米粒组织磁场结构之间的联系, 发现 Switchbacks 成群出现于一系列压力平衡结构 (PBS) 中, 这些结构具有 α 粒子丰度升高 (4%)、电子温度降低、磁场强度减弱等特征, 并在经度上呈周期性调制 (周期 $\approx 3^\circ\text{--}5^\circ$)。通过弹道回溯将这些结构回溯至太阳表面磁场漏斗的边缘区域。另外, ISOIS 探测到的 85 keV 超热离子被证认为 α 粒子高能尾部, 为交换重联机制提供了线索。

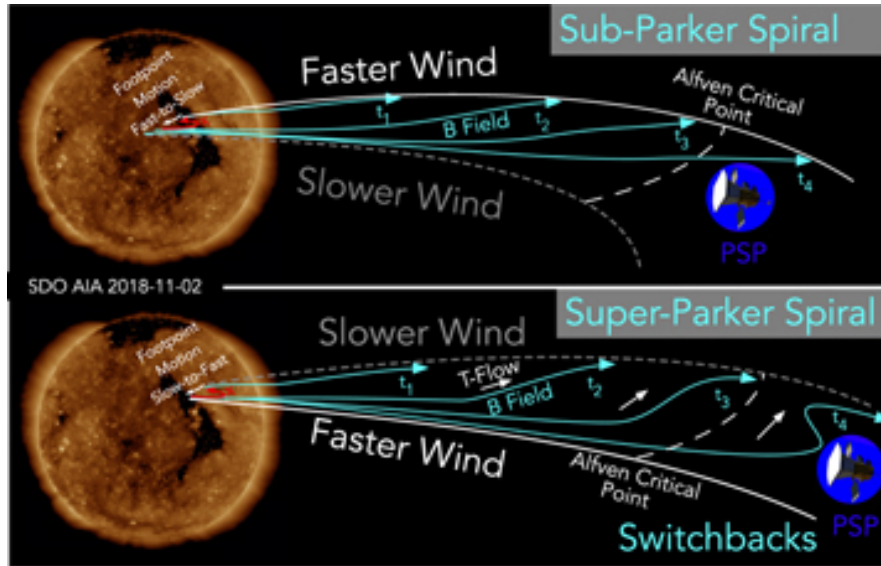


图 7 超帕克螺旋和次帕克螺旋模型示意图^[73]

与交换重联作为直接机制不同, Schwadron 和 McComas^[73] 提出了以太阳风速度剪切与足点运动为核心的超帕克螺旋模型: 当磁力线足点由低速风区向高速风区运动时, 磁场在阿

尔芬点以上被压缩,其径向分量随距离迅速减小并最终反向,从而形成 Switchbacks (图 7)。该机制同时自然地解释了与 Switchbacks 共存的单向横向流(方向与太阳自转一致),且模型预测的速度剪切、磁场反转尺度与 FIELDS - SWEAP 协同观测高度一致,为 Switchbacks 的宏观分布与统计特性提供了新的几何 - 动力学框架。

另一方面,Shoda 等^[74]通过全球三维 MHD 模拟表明,Switchbacks 可由阿尔芬波湍流自发产生,无需依赖日冕瞬态事件(如交换磁重联)作为触发机制。模拟再现了 PSP 在 E1 期间观测到的强阿尔芬性慢速太阳风和以阿尔芬速度传播的 Switchbacks。尽管模拟中 Switchbacks 的发生频率低于观测,但通过提高分辨率或增大驱动振幅,模拟的发生频率可显著提升,有力地支持了“湍流自组织产生 Switchbacks”机制的可能。

对于 Switchbacks 在形成后的长期演化,Tenerani 等^[75]利用 2.5D MHD 进行了“前半段”的模拟。结果表明,即使其幅度接近单位量级($\frac{\delta B}{B} \sim 1$),该结构在参量衰变不稳定性将其完全破坏之前,仍可持续数百个阿尔芬穿越时间(对应传播距离 18–43 $R_{\odot}$,视系统尺度而定)而不完全消散,从而为“日冕源区产生的初始扰动可存活并传播至 PSP 观测区域”提供了关键理论支持。而 Rivera 等^[76]通过 PSP 和 Solar Orbiter 的联合观测,补上了“后半段”的演化过程。该工作追踪了高速太阳风流从日冕附近到金星轨道附近的完整演化过程,发现大振幅阿尔芬波(观测形态表现为 Switchbacks patches)的耗散足够支撑太阳风从 $386 \pm 26 \text{ km/s}$ 加速至 $512 \pm 15 \text{ km/s}$ 并维持较高温度所需的能量。

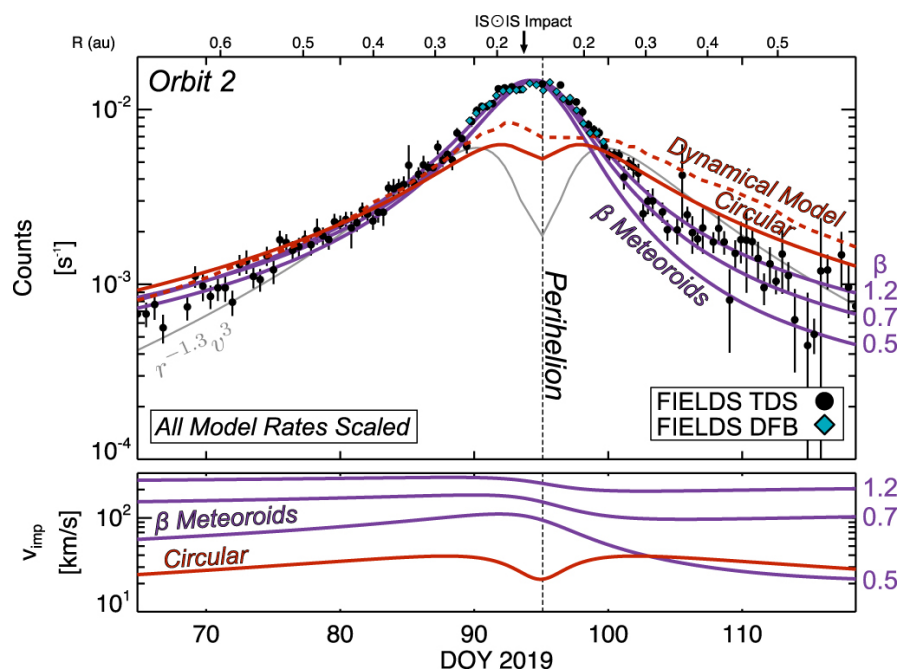
综上所述,Switchbacks 可能源于太阳源区的动力学过程(如磁重联或磁足点运动),也可能是在太阳风传播过程中由湍流自组织产生。然而,正是 PSP 多载荷数据的协同分析,不仅揭示了该现象的多维特征,更为区分和验证这些理论提供了观测约束,推动了太阳风起源研究。

2.4 近日尘埃环境探测

PSP 的近距离探测不仅更新了我们对于太阳风的认知,也为近日尘埃环境研究提供了首批原位线索。尽管 PSP 未搭载专用尘埃探测器,其多学科载荷,尤其是 FIELDS 的时域采样器(TDS)和数字场板(DFB),可通过尘埃撞击引发的电压尖峰间接探测微流星体。

Szalay 等^[77]结合 FIELDS 数据与 IS $\odot$ IS/EPI - Lo 的 L31 准直器穿孔事件,发现 PSP 所处环境的尘埃撞击信号主要由 β - 流星体(受辐射压力驱动、沿双曲线轨道逃逸太阳系的小颗粒)主导,其数密度随日心距离 r 呈 $n \propto r^{-2}$ 分布,显著区别于束缚轨道尘埃的 $n \propto r^{-1.3}$ (图 8)。基于此,估计黄道云因 β - 流星体逃逸导致的质量损失率为 1–14 吨/s(假设 β - 流星体主导)。这些结果凸显了 PSP 作为研究近日尘埃起源与演化的平台,将来更近的飞掠将进一步约束 β - 流星体的源区及对黄道尘云长期演化的贡献。

McComas 等^[78]研究了 IS $\odot$ IS 在 PSP 前两轨对 ~ 0.16 – 0.65 AU 区域的高能粒子环境直接观测数据,揭示了该区域存在多种太阳高能粒子事件(图 9),并对其加速和传播机制做了解释。该研究表明,日冕相互作用区域(CIRs)、CME 以及脉冲性事件等太阳活动都能加速粒子。另外,近日点附近的 Z-rich 脉冲事件和首次观测到的小型 SEP 事件表明,这类事件可能比之前认为的更普遍。这也是 PSP 史无前例地靠近太阳所带来的优势所在。这些发现



注: 上图展示了不同模型的撞击率比较, 其中黑点和黄色菱形分别代表 TDS 和 DFB 的实际观测值。紫线表示 β -流星体模型, 红色实线为圆形轨道模型, 红色虚线则表示动力学模型。下图进一步对比了 β -流星体模型与圆形轨道模型的撞击速率差异。

图 8 E2 期间 FIELDS/TDS&DFB 记录的尘埃撞击事件的时间序列图^[77]

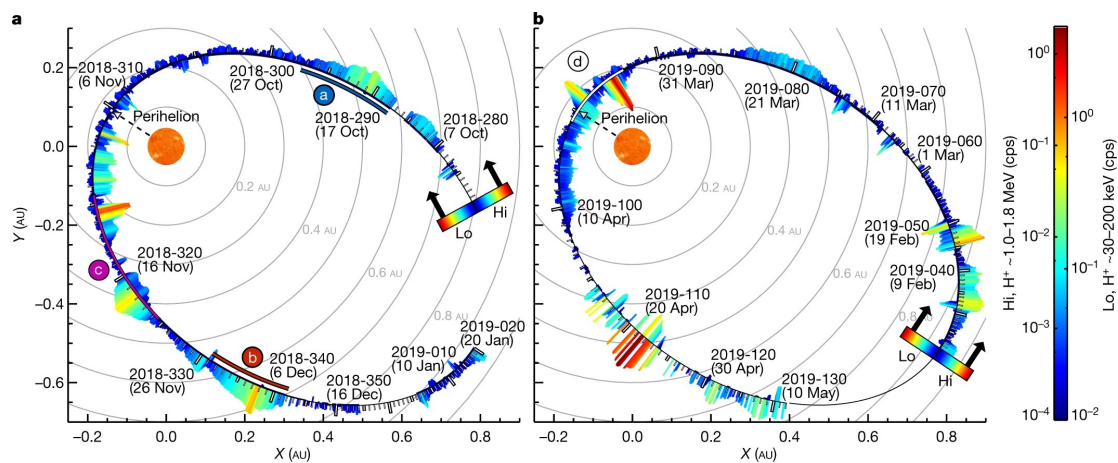


图 9 PSP 轨道 1 和 2 的高能粒子观测图^[78]

为理解太阳高能粒子的起源、加速和传播提供了重要证据，推动了我们太阳系空间天气的理解。

随着 PSP 逐步靠近太阳，IS $\odot$ IS 对高能粒子的高精度测量，使其能对复杂的等离子体物理过程提供决定性的诊断。Bale 等^[79]基于 IS $\odot$ IS/EPI-Lo 所获得的高能粒子能谱的分析，发现能量延伸至 100 keV 以上的质子的幂律分布 ($\rho = -9$) 与交换重联 (interchange reconnection) 的 PIC 模拟对质子的预测高度一致 ($\rho = -8.6$)，这为“交换重联是驱动冕洞快速太阳风的最主要机制”这一论断提供了迄今为止最直接的观测证据。Schwadron 等^[80]则利用 IS $\odot$ IS 数据，结合 WISPR 的遥感成像数据，在 CME 侧翼中实现了粒子特性与宏观形态的联合诊断，揭示 CME 作为高能粒子“储层”的关键角色，排除了局地波动加速机制，为理解太阳高能粒子的来源与输运提供了新的证据。

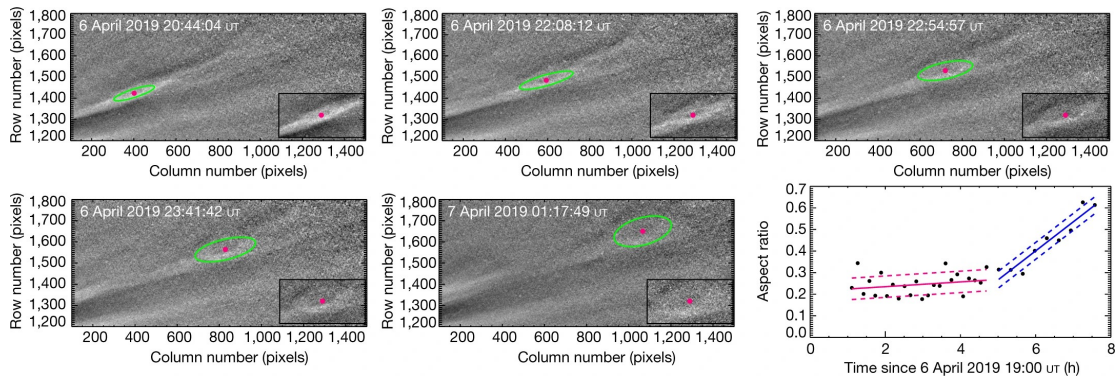


图 10 E2 期间冕流内部一个磁岛的形成和传播^[81]

Howard 等^[81]报道了在 E1 和 E2 (0.16–0.25 AU) 期间对日冕的观测结果，发现在角距小于 20° (近太阳) 处，F 冕的亮度随 PSP 距离太阳的减小而降低，间接证实了无尘区的存在。无尘区 (dust-free zone) 是早前理论预测存在的一个太阳附近由于高温导致的尘埃升华区域^[82–84]，以往对尘埃散射的观测无法印证无尘区的存在^[85, 86]，对 K 冕的观测不仅证实了日冕的大尺度拓扑结构也揭示了冕流的复杂结构，如 DeForest 等^[87]预测的那样，是由更小的子冕流组成，且在所有的可观测尺度上子冕流都存在着持续性的密度变化和波动，这样的密度波动反映了日冕等离子体的动态特性。在 E2 期间，WISPR 首次观测到了由撕裂模不稳定性在电流片中形成的磁岛结构 (图 10)。

Liewer 等^[88]利用 WISPR 在 E8 和 E11 期间穿越日球层电流片 (HCS) 时的成像数据，首次从冕流内部对 HCS 附近的等离子体结构进行了高分辨率分析，发现 HCS 并非均匀结构，而是由大量细密、亮度不一的射线状结构组成，显示出显著的横向变化。

此外，PSP 多载荷观测数据还从多方面更新了我们对于近日球层的认知。在等离子体基本参数研究方面，Huang 等^[89]发展了一种新方法，通过联合分析 SWEAP/SPC 测量的视向质子温度与 FIELDS/MAG 提供的瞬时磁场方向，成功导出质子温度各向异性，发现 PSP 在近日区域观测到的质子温度各向异性与 β 的关系仍受磁镜不稳定性和 firehose 不稳定性阈值的

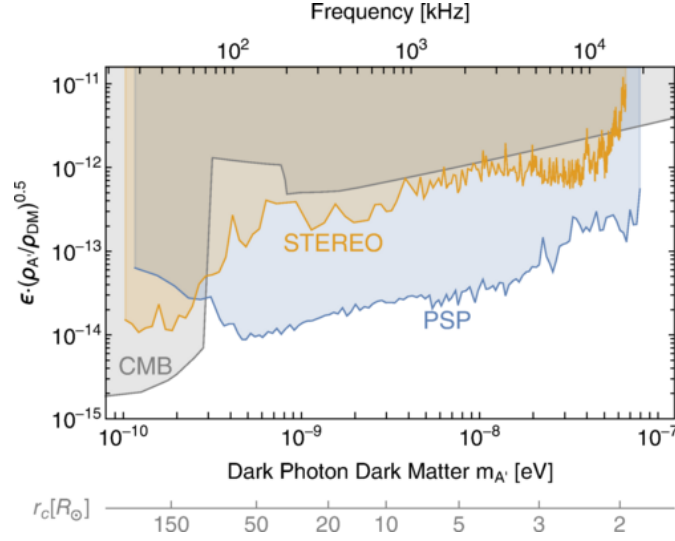
约束,但其各向异性程度显著高于 1 AU 处的观测值,表明越靠近太阳,各向异性的加热和冷却效应越强。另外, Maksimovic 等^[90]利用 *FIELDS*/*RFS* 获得的总电子温度,与 *SWEAP*/*SPAN* 直接测量的电子温度进行对比/验证,首次在 0.15 AU 处原位证实了电子温度与太阳风速度之间存在反相关关系。该反相关关系是日冕源区性质的遗迹,随着太阳风向外传播,由于不同速度太阳风的电子具有不同的冷却速率,这为理解太阳风电子的热力学演化提供了关键线索。

有关太阳风精细结构研究, Zhao 等^[91]利用 *FIELDS* 和 *SWEAP* 的数据,首次在 0.3 AU 以内系统性地识别出了小尺度磁通量绳 (SFR)。通过小波分析计算了归一化磁螺度 (σ_m)、交叉螺度 (σ_c) 和剩余能量 (σ_r) 的频谱,据此确立了 SFR 的判别标准 ($|\sigma_m| > 0.7$, $|\sigma_c| < 0.4$, $\sigma_r < -0.5$)。Szabo 等^[92]对日球层电流片 (HCS) 的识别也依赖于多载荷证据。他们将 *FIELDS*/*MAG* 的磁场极性测量与 *SWEAP*/*SPAN-E* 观测的超热电子投掷角分布 (PAD) 相结合,建立了可靠的双判据:只有同时满足磁场极性反转和电子 PAD 出现 180° 翻转的事件,才被确认为真正的 HCS 穿越。被观测到的 HCS 穿越事件常伴随复杂的局部结构,如密度增强、磁场谷区或磁通量绳等。而通过对比 *Wind* 探测器在 1 AU 的观测,发现 HCS 的全球大尺度结构在传播中保持稳定,但其附近的小尺度结构在向内日球层传播过程中发生了显著变化。Lavraud 等^[93]则对 HCS 以及等离子体片 (Plasma Sheet, HPS) 的物理特性进行了研究,揭示了 HPS 并非单一结构,而是由磁重联产生的高 β 等离子体团和磁通量绳组成的复杂序列。

当然,除了上述精细结构外, PSP 的高分辨率观测还揭示了精细结构内部可能存在的一种能量释放机制——频繁发生的磁重联喷流事件。Phan 等^[94]通过联合 *FIELDS* 磁场与 *SWEAP*/*SPC* 的质子速度数据,识别出在日冕物质抛射 (ICME)、HCS 和常规太阳风中的 21 个磁重联喷流事件,并发现速度剪切和等离子体 β 值是区分重联与非重联电流片的关键因素。

在理论模型验证上, PSP 多载荷数据亦起到了重要作用。Réville 等^[95]利用一个包含阿尔芬波动力学的三维 MHD 模型,模拟了 PSP 在 E1 探测期间的太阳风,模拟结果与 *FIELDS* 和 *SWEAP* 的观测数据进行对比,证实阿尔芬波的传播、耗散和加热过程对于准确再现太阳风的大尺度特性 (如速度、密度和磁场) 至关重要。该模型成功预测了 PSP 穿越 HCS 的次数和太阳风等离子体的源区。

Trotta 等^[96]联合分析了 PSP 在 0.07 auAU 和 *Solo* 在 0.7 auAU 处对同一次 CME 驱动激波的观测,揭示了激波在传播过程中与太阳风中小尺度结构 (如磁折返和离子回旋波) 的相互作用机制: Switchbacks 在激波通过后仍保持其阿尔芬特性,但被压缩和拉伸,而离子回旋波在激波下游消失,可能与激波后湍流增强和共振条件破坏有关。Palmerio^[97]等则利用 *BepiColombo* 和 PSP 在相距仅 0.03 AU 的条件下对同一快速 CME 进行联合观测,发现观测到的 CME 结构存在显著差异,表明 CME 在小尺度上的结构复杂性远超预期。



注：PSP（蓝色）、STEREO（橙色）与宇宙微波背景（灰色）对动能混合参数 ϵ 的限制对比。PSP 数据给出了当前最强的约束。

图 11 PSP 对暗光子与光子动能混合参数 ϵ 的最新观测限制^[98]

2.5 非太阳物理领域的其他研究进展

PSP 的主要观测对象是太阳，但史无前例的近日原位观测为其他领域的研究提供了难得的机会。当今世界存在两大科学谜团：暗物质与超越标准模型。人们提出暗光子（Dark Photon）作为超轻玻色子暗物质的候选者。它源于标准模型外的新 $U(1)$ 规范场，与普通光子之间可以经强度 ϵ 的动能混合（Kinetic Mixing）后在特定条件下转化为可探测的普通光子，例如在太阳风等离子体中可以通过共振转换机制转化为几乎单色的光子（暗光子质量 $m_{A'}$ 与局域等离子体频率 ω_p 相等时转换概率最大）。以往对暗光子的探测有传统地面射电和宇宙学方法的辐射功率谱分析，但分别受限于 MHz 以下频段的观测盲区，间接探测的精度不足。

FIELDS 的子系统 RFS 覆盖了地面无法观测到的 MHz 以下频段，采取 Leblanc 等人于 1998 年提出的日地间电子数密度经验模型^[99]与转换公式 $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi\alpha_{EM}n_e}{m_e}}$ ，2025 年，清华大学安海鹏等人^[98]使用 RFS 通过 QTN 分析得到的电子数密度数据，得到了太阳到地球的连续等离子频率剖面模型 $\omega_p(r)$ 。根据暗光子的共振转换机制（不同日地距离对应不同等离子体频率，同时对应不同质量暗光子转换概率最大的信号源头），通过不断降低强度 ϵ 数值，寻找理论预言的频谱尖峰信号，首次在 10kHz 至 20MHz 频段，对暗光子与普通光子的动能混合参数 ϵ 给出了迄今为止最严格的观测限制（ $\epsilon \lesssim 10^{-14}-10^{-13}$ ），比之前 CMB 宇宙学限制提高了 1-2 个数量级（图 11）。该研究结果为未来太阳探测计划、下一代深空射电阵列的多信使暗物质搜寻奠定了方法基础。

3 总结与讨论

在过去 7 年的近日点观测中, **PSP** 不仅发现慢速太阳风起源于低纬小冕洞, 并部分源自冕流及其边界区域, 还揭示其具有高度结构化的特征; 同时, **PSP** 提供了湍流在小尺度上通过耗散加热太阳风的关键证据, 阐明并构建了太阳风中大尺度磁场反转结构 (**Switchbacks**) 的等离子体动力学特征及其起源与演化图景; 其对近日尘埃环境及太阳高能粒子起源、加速与传播过程的观测, 为深入理解日球层空间天气奠定了重要基础。值得一提的是, **PSP** 还在暗光子暗物质的探测方面取得了意外的收获。综合来说, **PSP** 的科学成果是卓越的, 跨时代的: 史无前例的近日距离, 为我们探究近日环境提供了前所未有的观测数据; 原位测量设计使得研究更多聚焦于与地球息息相关的太阳风研究上; 多载荷的考虑, 则使得研究和视角具有全局性和完整性。

回顾 **PSP** 这 7 年的观测运行和科学产出, 我们充分地意识到, 太阳的空间探测, 甚至是抵近观测对太阳物理和空间物理研究是至关重要的。对于我国这样的大国, 发射自主太阳探测卫星是迫在眉睫的。2021 年——2022 年, 羲和号和夸父一号 (**ASO-S**) 卫星先后升空, 这标志着中国在太阳探测领域正式进入空间时代, 不过与国外已发射了 70 多颗太阳探测卫星相比, 我们的差距非常明显。而且从 **PSP** 的科学结果来看, 从不同的视角探测太阳还存在巨大的科学发现的潜力, 我国科学家提出的太阳极轨天文台 (**SPO**) 计划, 将从太阳极区进行直接成像观测, 预计将对一系列太阳物理的重大问题做出独特的科学贡献。

参考文献:

- [1] Harvard-Smithsonian CfA, SWEAP. http://sweap.cfa.harvard.edu/PSP_Spacecraft.html, 2025
- [2] Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. SSRv, 2016, 204: 7
- [3] Bale S D, Goetz K, Harvey P R, et al. SSRv, 2016, 204: 49
- [4] McComas D J, Alexander N, Angold N, et al. SSRv, 2016, 204: 187
- [5] Kasper J C, Abiad R, Austin G, et al. SSRv, 2016, 204: 131
- [6] Vourlidas A, Howard R A, Plunkett S P, et al. SSRv, 2016, 204: 83
- [7] Bale S D, Badman S T, Bonnell J W, et al. Nat, 2019, 576: 237
- [8] Badman S T, Bale S D, Oliveros J C M, et al. ApJS, 2020, 246: 23
- [9] Panasenco O, Velli M, D'Amicis R, et al. ApJS, 2020, 246: 54
- [10] Moncuquet M, Meyer-Vernet N, Issautier K, et al. ApJS, 2020, 246: 44
- [11] Bowen T A, Mallet A, Huang J, et al. ApJS, 2020, 246: 66
- [12] Rouillard A P, Kouloumvakos A, Vourlidas A, et al. ApJS, 2020, 246: 37
- [13] Halekas J S, Whittlesey P, Larson D E, et al. ApJS, 2020, 246: 22
- [14] Verniero J L, Larson D E, Livi R, et al. ApJS, 2020, 248: 5
- [15] Iroshnikov P S. Astronomicheskii Zhurnal, 1963, 40: 742
- [16] Kraichnan R H. Physics of Fluids, 1965, 8: 1385
- [17] Shebalin J V, Matthaeus W H, Montgomery D. Journal of Plasma Physics, 1983, 29: 525
- [18] Goldreich P, Sridhar S. ApJ, 1995, 438: 763
- [19] Lithwick Y, Goldreich P, Sridhar S. ApJ, 2007, 655: 269
- [20] Boldyrev S. ApJ, 2005, 626: L37
- [21] Zank G P, Matthaeus W H. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1991, 3: 69
- [22] Zank G P, Matthaeus W H. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1993, 5: 257
- [23] Heinemann M, Olbert S. JGR, 1980, 85: 1311
- [24] Velli M. A&A, 1993, 270: 304
- [25] Verdini A, Velli M. ApJ, 2007, 662: 669
- [26] Chen C H K, Bale S D, Bonnell J W, et al. ApJS, 2020, 246: 53
- [27] Zhao L L, Zank G P, Adhikari L, et al. ApJ, 2020, 898: 113
- [28] Kasper J C, Klein K G, Lichko E, et al. PhRvL, 2021, 127: 255101
- [29] Telloni D, Sorriso-Valvo L, Woodham L D, et al. ApJ, 2021, 912: L21
- [30] Zank G P, Zhao L L, Adhikari L, et al. ApJ, 2022, 926: L16
- [31] Bowen T A, Bale S D, Chandran B D G, et al. Nature Astronomy, 2024, 8: 482
- [32] Adhikari L, Zank G P, Zhao L L, et al. ApJS, 2020, 246: 38
- [33] Adhikari L, Zank G P, Zhao L L. ApJ, 2020, 901: 102
- [34] Ruffolo D, Matthaeus W H, Chhiber R, et al. ApJ, 2020, 902: 94
- [35] Bandyopadhyay R, Goldstein M L, Maruca B A, et al. ApJS, 2020, 246: 48
- [36] Krupar V, Szabo A, Maksimovic M, et al. ApJS, 2020, 246: 57
- [37] Kontar E P, Emslie A G, Clarkson D L, et al. ApJ, 2023, 956: 112
- [38] Fu X, Li H, Gan Z, et al. ApJ, 2022, 936: 127
- [39] Cuesta M E, Chhiber R, Fu X, et al. ApJ, 2023, 949: L19
- [40] Zhao L L, Silwal A, Zhu X, et al. ApJ, 2025, 979: L4
- [41] Brodiano M, Dmitruk P, Andrés N. Physics of Plasmas, 2023, 30: 32903
- [42] Zank G P, Zhao L L, Adhikari L, et al. ApJ, 2024, 966: 75
- [43] Zank G P, Zhao L L, Adhikari L, et al. Physics of Plasmas, 2021, 28: 080501
- [44] Behannon K W, Burlaga L F. Solar Wind 4. 1981: 374

- [45] Borovsky J E. JGR, 2016, 121: 5055
- [46] Horbury T S, Matteini L, Stansby D. MNRAS, 2018, 478: 1980
- [47] Balogh A, Forsyth R J, Lucek E A, et al. GRL, 1999, 26: 631
- [48] van Ballegooyen A A, Cartledge N P, Priest E R. ApJ, 1998, 501: 866
- [49] Kahler S W, Crocker N U, Gosling J T. JGR, 1996, 101: 24373
- [50] Landi S, Hellinger P, Velli M. GRL, 2006, 33
- [51] Neugebauer M. ApJ, 2012, 750: 50
- [52] Neugebauer M, Goldstein B E. AIP Conf Ser, 2013, 1539: 46
- [53] Yamauchi Y, Suess S T, Steinberg J T, et al. JGR, 2004, 109
- [54] Matteini L, Horbury T S, Neugebauer M, et al. GRL, 2014, 41: 259
- [55] Matteini L, Horbury T S, Pantellini F, et al. ApJ, 2015, 802: 11
- [56] Borovsky J E. JGR, 2008, 113
- [57] Antiochos S K, Mikić Z, Titov V S, et al. ApJ, 2011, 731: 112
- [58] Fisk L A, Schwadron N A. ApJ, 2001, 560: 425
- [59] Velli M, Lionello R, Linker J A, et al. ApJ, 2011, 736: 32
- [60] Kasper J C, Bale S D, Belcher J W, et al. Nat, 2019, 576: 228
- [61] McManus M D, Bowen T A, Mallet A, et al. ApJS, 2020, 246: 67
- [62] Mozer F S, Agapitov O V, Bale S D, et al. ApJS, 2020, 246: 68
- [63] Krasnoselskikh V, Larosa A, Agapitov O, et al. ApJ, 2020, 893: 93
- [64] Larosa A, Krasnoselskikh V, de Wit T D, et al. A&A, 2021, 650: A3
- [65] de Wit T D, Krasnoselskikh V V, Bale S D, et al. ApJS, 2020, 246: 39
- [66] Fargette N, Lavraud B, Rouillard A P, et al. ApJ, 2021, 919: 96
- [67] Woodham L D, Horbury T S, Matteini L, et al. A&A, 2021, 650: L1
- [68] Fisk L A, Kasper J C. ApJ, 2020, 894: L4
- [69] Horbury T S, Woolley T, Laker R, et al. ApJS, 2020, 246: 45
- [70] Zank G P, Nakanotani M, Zhao L L, et al. ApJ, 2020, 903: 1
- [71] Drake J F, Agapitov O, Swisdak M, et al. A&A, 2021, 650: A2
- [72] Bale S D, Horbury T S, Velli M, et al. ApJ, 2021, 923: 174
- [73] Schwadron N A, McComas D J. ApJ, 2021, 909: 95
- [74] Shoda M, Chandran B D G, Cranmer S R. ApJ, 2021, 915: 52
- [75] Tenerani A, Velli M, Matteini L, et al. ApJS, 2020, 246: 32
- [76] Rivera Y J, Badman S T, Stevens M L, et al. Sci, 2024, 385: 962
- [77] Szalay J R, Pokorný P, Bale S D, et al. ApJS, 2020, 246: 27
- [78] McComas D J, Christian E R, Cohen C M S, et al. Nat, 2019, 576: 223
- [79] Bale S D, Drake J F, McManus M D, et al. Nat, 2023, 618: 252
- [80] Schwadron N A, Bale S D, Bonnell J, et al. ApJ, 2024, 970: 98
- [81] Howard R A, Vourlidas A, Bothmer V, et al. Nat, 2019, 576: 232
- [82] Lamy P L. A&A, 1974, 33: 191
- [83] Mukai T, Yamamoto T, Hasegawa H, et al. PASJ, 1974, 26: 445
- [84] Russell H N. ApJ, 1929, 70: 11
- [85] Lamy P, Kuhn J R, Lin H, et al. Sci, 1992, 257: 1377
- [86] Leinert C, Hanner M, Link H, et al. A&A, 1978
- [87] DeForest C E, Howard R A, Velli M, et al. ApJ, 2018, 862: 18
- [88] Liewer P C, Vourlidas A, Stenborg G, et al. ApJ, 2023, 948: 24
- [89] Huang J, Kasper J C, Vech D, et al. ApJS, 2020, 246: 70
- [90] Maksimovic M, Bale S D, cič L B, et al. ApJS, 2020, 246: 62
- [91] Zhao L L, Zank G P, Adhikari L, et al. ApJS, 2020, 246: 26
- [92] Szabo A, Larson D, Whittlesey P, et al. ApJS, 2020, 246: 47
- [93] Lavraud B, Fargette N, Réville V, et al. ApJL, 2020, 894: L19

-
- [94] Phan T D, Bale S D, Eastwood J P, et al. *ApJS*, 2020, 246: 34
 - [95] Réville V, Velli M, Panasenco O, et al. *ApJS*, 2020, 246: 24
 - [96] Trotta D, Larosa A, Nicolaou G, et al. *ApJ*, 2024, 962: 147
 - [97] Palmerio E, Carcaboso F, Khoo L Y, et al. *ApJ*, 2024, 963: 108
 - [98] An H, Ge S, Liu J, et al. *PhRvL*, 2025, 134: 171001
 - [99] Leblanc Y, Dulk G A, Bougeret J L. *Sol Phys*, 1998, 183: 165
 - [100] Krupar V, Szabo A, Maksimovic M, et al. *ApJS*, 2020, 246: 57

Discoveries obtained by Parker Solar Probe from Seven Years' Observations

LUO Peixin^{1,2}, TAN Baolin²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China)

Abstract: The Parker Solar Probe (PSP) is currently the closest space probe to the Sun. Since its launch, it has been operating stably for 7 years, and its related payloads and joint-observations have provided unprecedented opportunities for the study of key problems in the fields of solar physics and space physics. This review will summarize the important scientific discoveries from the observations over the past 7 years, including the origin and evolution of the slow solar wind, the structural identification of large-scale magnetic field reversal switchbacks, the contribution of turbulence evolution and energy dissipation to solar wind heating, the acceleration of near-Sun space dust environments and high-energy particles, and the detection of dark photons and dark matter. The above results provide important reference and guidance for the next-generation solar space exploration plans.

Key words: solar observations; solar wind; space weather